黏性 Geldart B 类颗粒流化特性实验研究

马吉亮[1,2] 刘道银[1] 梁 财[1] 陈晓平[1]

(1. 东南大学能源热转换及过程测控教育部重点实验室，南京 210096；
2. 华东理工大学煤气化及能源化工教育部重点实验室，上海 200237)

摘 要 本文基于多源 X 射线层析成像技术及联合代数重建算法 (SART) 首次重构出黏性 B 类颗粒流化时局部气泡的三维形态，并结合压力脉动分析技术获得了丰富的全局流态化信息。实验结果表明，黏性力的增加强化了气泡间的合并作用，导致气泡的尺寸上升，频率和速度下降，当床温超过 35°C 后，节涌状态被激发，并与自由流化状态交替产生。而且，黏性力越大，节涌在流化过程中所占的时间比例越长。

关键词 黏性颗粒；X 射线层析成像；压力脉动分析；流态化
中图分类号：TQ021 **文献标识码**：A **文章编号**：0253–231X(2017)08–1702–05

Experimental Study on the Fluidization Dynamics of Cohesive Geldart B Particles

MA Ji-Liang[1,2] LIU Dao-Yin[1] LIANG Cai[1] CHEN Xiao-Ping[1]

(1. *Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096 China;*
2. *Key Laboratory of Coal Gasification and Energy Chemical Engineering of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China*)

Abstract This paper first reconstructed three dimensional version of local bubbles in a fluidized bed processing cohesive Geldart B particles with a combination of X-ray tomography and Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART). Additionally, global fluidization dynamics were also obtained using in-bed pressure fluctuation analysis. The experimental results show that the preserve of cohesive force facilitates bubble coalescence, thus increasing the bubble size and decreasing the bubble frequency and bubble rising velocity. When the bed temperature exceeds 35°C, slugging takes place alternatively with normal fluidization. Moreover, the duration of slugging sharply increases with the cohesive force.

Key words cohesive particles; X-ray tomography; pressure fluctuation analysis; fluidization

0 前 言

流化床反应器因其高效的传热传质与连续处理大量颗粒的能力，在不同工业领域中得到了广泛的应用。伴随着流化床处理对象与手段的多样化，颗粒间经常出现黏性力 (如干燥、造粒、涂层等过程)，导致颗粒的流动性降低，流态化行为发生改变，从而影响流化床内的反应效率以及反应器的稳定运行。因此，揭示黏性力对流态化特性的影响规律和内在机理，对流化床反应器的设计和运行具有重要的指导意义。

黏性力的种类众多，本文着重探讨接触式黏性力，即在颗粒接触后产生的吸引力 [1]，其中以液桥力 [2] 和固桥力 [3] 最具代表性。对于液桥力存在下的流态化特性研究起步较早，最初集中在湿颗粒的临界流化特性 [4,5]。近年来，研究重点逐渐向流型转化 [6,7]、乳化相流动形态 [8] 及流化失效判定 [9] 等方面迁移。需要指出的是，从实验角度出发，在颗粒间均匀引入液桥力的难度较大，导致黏性力易呈各向异性，降低结果的准确性。针对此不足，Shabanian 等采用 “多聚物涂层” 法引入固桥力作为接触式黏性力 [10]，并系统地研究了不同黏性力作用下流化状态从鼓泡流化向湍流流化转变特性的差异 [11,12]。

由上可知，已有研究多集中在黏性力对乳化相流动行为的影响规律上，对于气泡相的研究较少，而气泡特性恰恰是影响鼓泡流化床运行中传热传质的

收稿日期：2017-01-18; **修订日期**：2017-07-23
基金项目：国家重点研发项目 (No.2016YFB0600802)；中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.222201717004)
作者简介：马吉亮 (1984–)，男，讲师，主要从事气固两相流动特性研究，Email: jlma@seu.edu.cn

重要参数。此外，流态化在高黏性力作用下的失效机理，尤其是失效前后动力学参数的变化规律尚未见报道。

本文采用实验手段研究黏性 B 类颗粒在三维鼓泡流化床中的流化特性：利用“多聚物涂层”法引入接触式黏性力，并通过调节床温实现对黏性力的精确控制；基于荷兰代尔夫特理工大学搭建的多源 X 射线层析成像系统重构床内的局部三维气泡形态，同时结合压力脉动分析技术提取全局流态化信息，重点关注流化失效前后流体动力学特征的变化规律。

1 实验系统及方法

1.1 实验装置

图 1 所示为三维流化床实验系统图。流化床本体内径 140 mm，高 1800 mm，采用金属烧结板布风。实验通过电加热器及 PID 控制器调节流化风的温度，从而达到控制床层温度及颗粒间黏性力的目的。床层温度由布置在距布风板 110 mm 处的热电偶进行监测。在距离布风板 30 mm、110 mm、190 mm 和 270 mm 处分别布置了 Kistler 7261 型高敏压力传感器对床内表压进行测量。同时，基于 X 射线层析成像技术检测横截面上的空隙分布，其原理是当 X 射线穿过颗粒层时，射线强度会发生指数衰减：$I = I_0 e^{-\mu x}$，式中 I_0 和 I 分别为穿过颗粒层前后 X 射线的强度，x 为颗粒层长度，μ 为衰减系数。实验时，通过测量每条 X 射线强度的衰减率即可获得该条射线经过的颗粒层长度。本实验采用三个 X 射线源互呈 120° 角布置在流化床周围；每个射线源对应一组探测器，布置在流化床外侧与射线源相对的位置；每组探测器分为上下两排，每排由 32 个探测点构成。为了避免 X 射线辐射对实验人员健康的影响，所有实验设备均布置在由 5 mm 铅板围成的房间中。实验时通过电脑和数据采集卡实现对系统启停和实验数据采集的控制。X 射线强度数据的采集频率为 2500 Hz，采集时长 1 min；压力脉动信号的采集频率为 1250 Hz，采集时长 10 min。

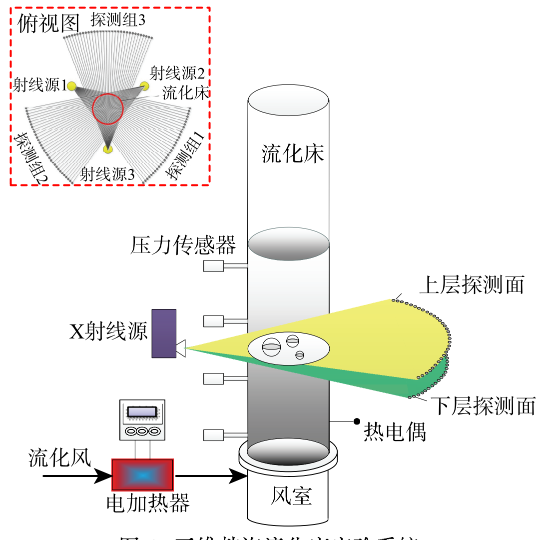


图 1　三维鼓泡流化床实验系统

Fig. 1　Schematic of experimental setup

1.2 实验材料

本实验采用“多聚物涂层”法引入黏性力 [10]，即在惰性颗粒表面均匀包裹一层多聚物，利用多聚物黏度对温度的高敏感性在颗粒间引发固桥力即接触式黏性力。该方法的优点是重复性好，黏性力分布均匀，操作温度低。实验采用直径 0.6 mm，密度 2500 kg/m^3 的玻璃珠作为“基底颗粒”，其临界流化风速 U_{mf} 为 0.325 m/s，属于 Geldart B 类颗粒；采用聚乙基丙烯酸酯 (PEA) 与聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 的混合物作为多聚物涂层。涂层过程在滚筒式包衣机内完成，操作步骤已在文献 [10] 中详细介绍。图 2 为涂层前后颗粒表面的 SEM 图。本文中，多聚物涂层厚度约为 10 μm。

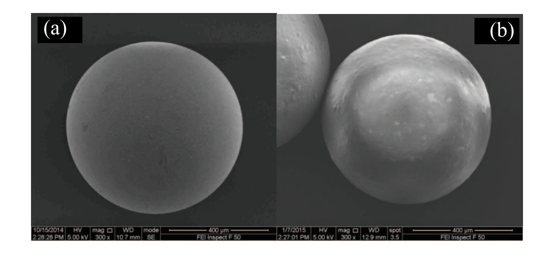


图 2　颗粒涂层前后的表面特性

(a) 涂层前，(b) 涂层后

Fig. 2　Surface morphology of particles before and after coating (a) coated (b) uncoated

1.3 数据处理方法

本文采用的压力脉动分析算法主要包括功率谱密度和平均频率等常用方法，因此不再赘述。下面将对气泡形态重构算法进行简要介绍。

气泡重构过程分为三步：1) 将 3 组探测器共 192 个探测点检测到的 X 射线强度代入标定函数，转化为每条 X 射线经过的颗粒层长度，P；2) 将重构区域 (流化床内壁的外切四边形) 网格化，并计算射线在网格内的权重因子 W，本文中重构区域的像素分辨率是 80×80；3) 求解式 (1)，获得每个像素内的颗粒份额 α。

$$p_i = \sum_{j=1}^{N} W_{ij} \alpha_j \tag{1}$$

式中，p_i 是射线 i 经过的颗粒层长度；W_{ij} 是射线 i 在像素 j 内的权重因子即射线长度；N 是图像内的

像素数。

本文采用 Anderson 和 Kak 于 1984 年提出的联合代数重建算法 (SART) 求解式 (1)。算法的实现过程已在文献 [13] 中进行了详细的论述。本文中，重构所用数据为每 10 组原始数据的平均值，意味着数据的有效采样频率由 2500 帧/秒降为 250 帧/秒。这虽然降低了重构结果的时间分辨率，但却有效地减小了由射线源强度波动造成的误差。图 3 对比了上下两层探测面在同一时刻的重构图像，图中白色区域被气泡占据。将不同时刻的重构图像进行叠加，即可获得经过探测面的三维气泡图像，如图 4 所示，图中红色对象为气泡。重构后，可以基于同一气泡在上下两层探测面上出现的时间差估算该气泡的上升速度。同理，也可以针对三维气泡提取尺寸、形状、频率、分布等特征参数。

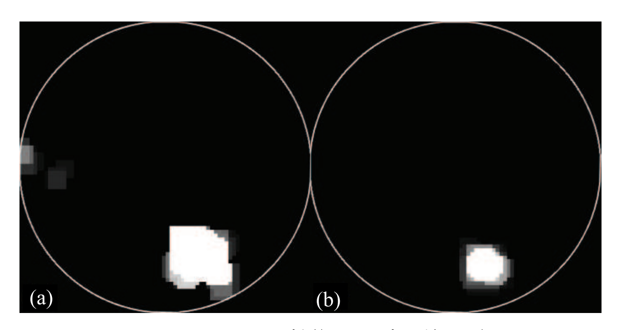


图 3 上下两层 X 射线平面重构结果对比
(a) 上层探测面，(b) 下层探测面
Fig. 3 Reconstructed results for upper and lower planes
(a) upper plane (b) lower plane

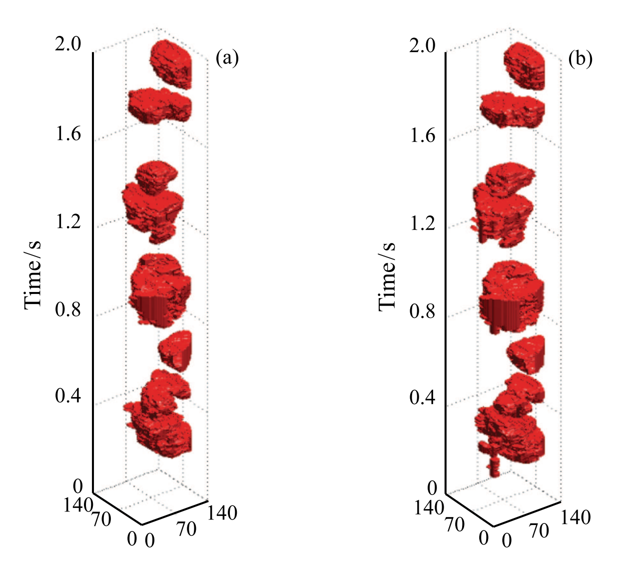


图 4 上下两层探测器 3D 气泡重构对比
(a) 上层探测面；(b) 下层探测面
Fig. 4 Reconstructed bubbles for the upper and lower planes
(a) upper plane (b) lower plane

2 结果与讨论

图 5 是不同黏性力作用下，距布风板 70 mm 横截面上的三维气泡重构图。当床温为 30°C 时，经过横截面的气泡体积较小、数量众多且存在彼此相连的多重气泡结构；随着黏性力的上升，气泡频率逐渐降低，气泡尺寸逐渐增加，意味着气泡间的合并作用增强；当床温达到 45°C 时，床内出现了横向尺寸与床内径相同的大气泡，流化状态转变为 “节涌”。气泡尺寸与黏性力间的正比关系证明了随着黏性力的增加，气泡相与乳化相之间的传质逐渐恶化。

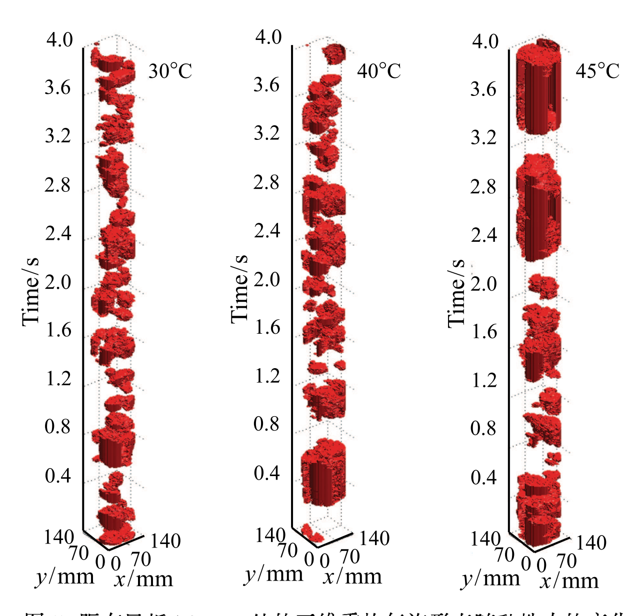


图 5 距布风板 70 mm 处的三维重构气泡形态随黏性力的变化规律，静止床高：300 mm，流化风速：$2.5U_{\mathrm{mf}}$
Fig. 5 Effects of cohesive force on the bubbles reconstructed at 70 mm from gas distributor. Static bed height: 300 mm, fluidization gas velocity: $2.5U_{\mathrm{mf}}$

图 6 所示为不同黏性力作用下各高度横截面上的气泡分布热图。图中各像素的颜色表征横截面上每一点被气泡占据的概率。在靠近布风板的区域 (图 6a, b)，随着黏性力的增加，气泡的合并增强，尺寸增大，因此床截面中心区域的气泡高概率区域逐渐扩张。随着测量高度的提升，气泡概率的变化特性与黏性力紧密相关：当黏性力较低时 (30°C)，气泡的横向尺寸伴随着气泡合并逐渐增加，气泡高概率区的面积增大；当黏性力较大时 (45°C)，节涌产生的料栓完全占据了横截面，导致气泡出现的概率降低，因此测量高度越大，高概率区的面积越小。

图 7 为不同高度截面上的平均气泡上升速度随黏性力的变化规律。随着黏性力的增加，平均气泡上升速度逐渐降低。这与传统的气泡理论即自由气

泡的上升速度与尺寸呈正比关系 [13] 相矛盾，意味着在黏性力作用下，床内存在许多大尺寸、低速度的气泡。基于图 5 的观测结果可以推测，这些低速气泡是伴随着节涌产生的气栓。理论上，气栓的上升过程与传统气泡不同：由于气栓同时受到颗粒重力以及料栓与边壁之间摩擦力的影响，导致其上升速度较小 [14]。伴随着黏性力的增加，节涌发生的频率提高，气栓在探测到的气泡中所占比例增加，导致平均气泡上升速度减小。需要注意的是，平均气泡速度在床温超过 35°C 后大幅下降，意味着该温度是床内节涌频繁发生的起始点。

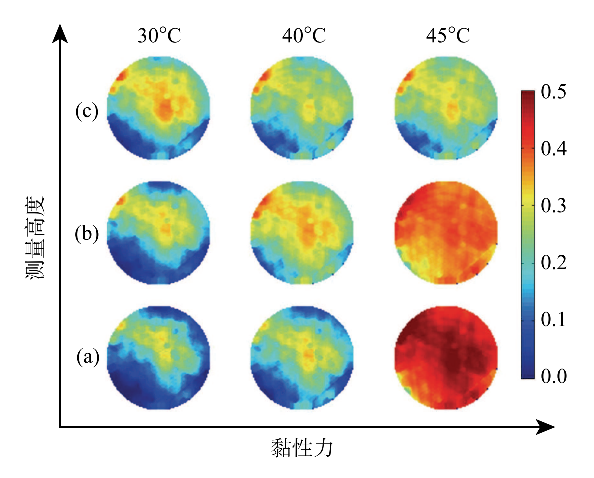


图 6　不同高度上的气泡分布热图随黏性力的变化规律
(a) 70 mm; (b) 150 mm; (c) 230 mm
静止床高：300 mm，流化风速：$2.5U_{mf}$

Fig. 6　Contour plots of bubble distribution as a function of cohesive force at different heights. Static bed height: 300 mm, fluidization gas velocity: $2.5U_{mf}$. (a) 70 mm; (b) 150 mm; (c) 230 mm

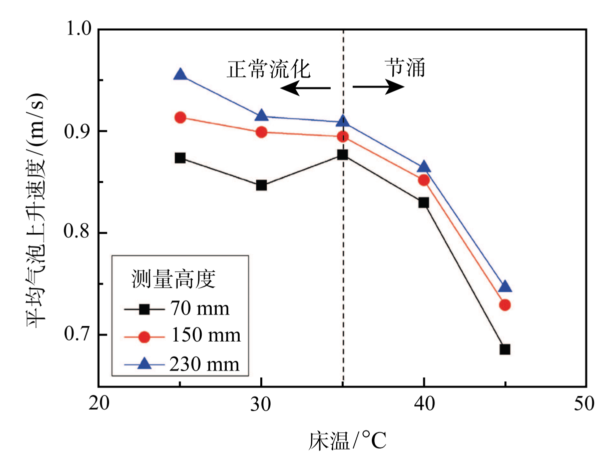


图 7　不同高度上的平均气泡上升速度随黏性力的变化规律，静止床高：300 mm，流化风速：$2.5U_{mf}$

Fig. 7　Effects of cohesive force on the averaged rising velocity of bubbles at different heights. Static bed height: 300 mm, fluidization gas velocity: $2.5U_{mf}$

图 8 为不同高度处的压力脉动信号功率谱密度 (PSD) 随黏性力的变化规律。当床温为 30°C 时，PSD 强度总体呈单峰分布，主频在 1 Hz 左右。除主峰外，PSD 曲线中还存在若干能量较小的独立峰，对应大气泡的破裂或多重气泡结构的产生。当黏性力较大时，PSD 强度由单峰分布转变为双峰分布，其中低频峰出现在 0.1 Hz 左右。由图 5 可知，双峰分别对应节涌和正常流化。而且由于正常流化状态在持续时间上占据主导地位，因此节涌对应的频率仅有 0.1 Hz 左右。随着黏性力的增加，床内产生了大量的复合结构气泡 [15]，因此 PSD 曲线的频带宽度逐渐增加；同时，曲线整体开始向低频方向移动，说明床内气泡数量逐渐降低；其中，低频峰的峰值随黏性力的上升而增加，说明气栓的尺寸逐渐增大，节涌持续时间逐渐延长。

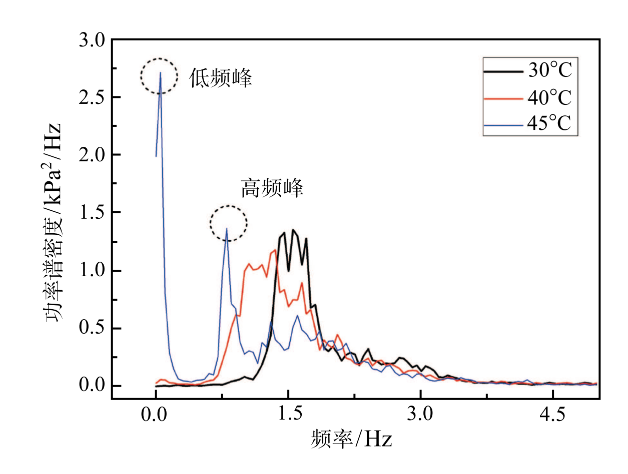


图 8　不同高度处压力脉动信号功率谱密度 (PSD) 随黏性力的变化规律，流化风速：$2.5U_{mf}$，静止床高：300 mm

Fig. 8　Power spectral density of pressure signal measured at different heights. Fluidization gas velocity: $2.5U_{mf}$, static bed height: 300 mm

图 9 为功率谱密度的平均频率 f_a 随黏性力和测量高度的变化规律。f_a 定义为压力信号功率谱密度图中，将信号能量二等分的频率，反映了不同物理现象在整体信号中所占比例。如图 9 所示，f_a 随着黏性力的增加逐渐降低：在 35°C 之前，气泡的合并作用增强，压力信号中处于低频区的“气泡通道效应”在信号中占据的比例提高 [16]，导致 f_a 逐渐降低，但由于 f_a 的下降幅度较小，说明此效应对压力信号的能量分布影响有限；当床温超过 35°C 后，床内出现低频节涌，促使能量分布向低频方向移动，导致 f_a 继续下降。而且，下降幅度迅速增加意味着节涌在流化过程中所占比例在 35°C 之后迅速上升。

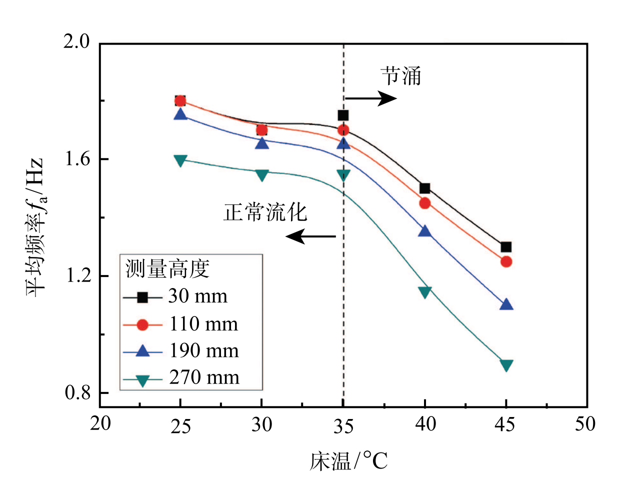


图 9 黏性力及测量高度对功率谱密度平均频率的影响，流化风速：$2.5U_{\mathrm{mf}}$，静止床高：300 mm

Fig. 9 Effects of cohesive force and measurement height on the average frequency of pressure signal. Fluidization gas velocity: $2.5U_{\mathrm{mf}}$, static bed height: 300 mm

3 结 论

本文结合 X 射线层析成像和压力脉动分析技术研究黏性 B 类颗粒在三维鼓泡流化床中的流化特性，获取了不同黏性力下的气泡形态演变，流化失效方式以及失效前后流化特征参数的变化规律，得到主要结论如下：

1) 当黏性力较大时，流化以节涌的方式失效，而且由于料栓的易破碎性，床内交替产生节涌和正常流化。随着黏性力的增加，流化过程中节涌持续时长所占比例逐渐增加；

2) 黏性力的存在促进了三维床中气泡的合并，导致气泡频率逐渐降低，气泡尺寸逐渐增加。由于低速气栓在气泡中的占比与黏性力呈正比关系，因此床内的平均气泡上升速度随黏性力的增加逐渐降低；

3) 伴随着节涌的产生，压力信号的功率谱密度呈双峰分布：低频峰对应节涌，高频峰对应正常流化。节涌在压力信号能量分布中所占比例随黏性力的增加而增加，导致平均频率在床温超过 35°C 后迅速下降。

参 考 文 献

[1] Makkawi Y T, Wright P C. Tomographic Analysis of Dry and Semi-wet Bed Fluidization: the Effect of Small Liquid Loading and Particle Size on the Bubbling Behavior [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 59(1): 201–213

[2] McLaughlin L J, Rhodes M J. Prediction of Fluidized Bed Behavior in the Presence of Liquid Bridge [J]. Powder Technology, 2001, 114(1-3): 213–223

[3] Tardos G, Pfeffer R. Chemical Reaction Induced Agglomeration and Defluidization of Fluidized Beds [J]. Powder Technology, 1995, 85(1): 29–35

[4] Zhou Y, Shi Q, Huang Z, et al. Effects of Interparticle Forces on Fluidization Characteristics in Liquid-containing and High-temperature Fluidized Beds [J]. Industry & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(47): 16666–16674

[5] Wormsbecker M, Pugsley T. The Influence of Moisture on the Fluidization Behaviour of Porous Pharmaceutical Granule [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(16): 4063–4069

[6] Wormsbecker M, Pugsley T, Tanfara H. Interpretation of the Hydrodynamic Behaviour in a Conical Fluidized Bed Dryer [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(8): 1739–1746

[7] Xu H, Zhong W, Jin B, et al. Flow Pattern and Transition in Gas-liquid-solid Three Phase Spouted Bed [J]. Powder Technology, 2014, 267: 18–25

[8] Zhou Y, Shi Q, Huang Z, et al. Effects of Liquid Action Mechanisms on Hydrodynamics in Liquid-containing Gas-solid Fluidized Bed Reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 285: 121–127

[9] Zhou Y, Ren C, Wang J, et al. Characterization on Hydrodynamic Behavior in Liquid-containing Gas-solid Fluidized Bed Reactor [J]. AIChE Journal, 2013, 59(4): 1056–1065

[10] Shabanian J, Fotovat J, Chaouki J, et al. Fluidization Behavior in a Gas-solid Fluidized Bed with Thermally Induced Inter-particle Forces [C]//10th International Conference on Circulating Fluidized Beds and Fluidization Technology, New York, 2013: 738–745

[11] Shabanian J, Chaouki J. Local Characterization of a Gas–solid Fluidized Bed in the Presence of Thermally Induced Interparticle Forces [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 119 (6): 261–273

[12] Shabanian J, Chaouki J. Hydrodynamics of a Gas–solid Fluidized Bed with Thermally Induced Interparticle Forces [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 259: 135–152

[13] Mudde R F. Bubbles in a Fluidized Bed: A Fast X-ray Scanner [J]. AIChE Journal, 2011, 57(10): 2684–2690

[14] 金涌，祝京旭，汪展文，等. 流态化工程原理 [M]. 北京：清华大学出版社, 2001
JIN Yong, ZHU Jingxu, WANG Zhanwen, et al. Fluidization Engineering Principles [M]. Tsinghua University Press, Beijing, 2004

[15] Jaiboon O A, Chalermsinsuwan B, Mekasut L, et al. Effect of Flow Pattern on Power Spectral Density of Pressure Fluctuation in Various Fluidization Regimes [J]. Powder Technology, 2013, 233 (2): 215–226

[16] Liu M, Zhang Y, Bi H T, et al. Non-intrusive Determination of Bubble Size in a Gas-solid Fluidized Bed: An Evaluation [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(11): 3485–3493